Los órganos de los sentidos de las abejas (I)

OJOS Y ANTENAS

Francisco Padilla Álvarez (padilla@uco.es), José Manuel Flores Serrano y Antonio J. Pérez Ruiz
Departamento de Zoología de la Universidad de Córdoba. Campus Universitario de Rabanales. 14071 Córdoba


El sentido del gusto.

Nuestras abejas están provistas de sistemas sensoriales que les permiten analizar su entorno vital. A veces resulta un tanto difícil comprender como funcionan dichos sistemas ya que en muchos casos nosotros establecemos comparaciones con nuestros propios órganos de los sentidos. Por ejemplo, los ojos de las abejas son desde un punto de vista estructural bastante diferentes a los nuestros, pero las dos especies (humanos y abejas) los utilizamos para un mismo fin: conocer mediante imágenes el mundo que nos rodea.
En el caso de las antenas la cosa se complica algo ya que nosotros carecemos de órganos de este tipo, y por este motivo a veces resulta algo complicado conocer para que utilizan las abejas sus antenas o que sentidos radican en estas estructuras.
Antes de continuar queremos hacer una advertencia y una recomendación al posible lector. Aunque hemos intentado explicar algunas cosas de forma clara y sin recurrir a muchos tecnicismos, en algunas ocasiones no ha sido posible. Por este motivo si el lector se siente algo "perdido" le recomendamos seguir leyendo y dejar atrás aquello que no entendió o que le resulta complicado de "ver".

1.- Las antenas

Lo primero que tenemos que saber sobre estas estructuras es que juegan un importante papel en la comunicación entre las abejas. En ellas se localizan una gran parte de los receptores de olfato y gusto.
Recordemos que el sentido del olfato es fundamental en la búsqueda del alimento. Por ejemplo, una planta en floración puede producir como media entre 40 y 50 compuestos volátiles diferentes que determinan su "olor". Si además dicha planta es rica en néctar, el insecto tiene que discriminar los olores asociados a esa planta específica en un entorno muy saturado de otros olores.
Antes de describir los tipos de receptores que podemos encontrar en estas estructuras cefálicas, es necesario describirlas desde un punto de vista morfológico.
Las antenas son apéndices articulados y muy móviles. De forma general las podemos describir como estructuras filiformes provistas de varios segmentos, siendo todos ellos más o menos similares en tamaño. La forma de las antenas puede variar enorme-

mente de unos insectos a otros.
En las abejas cada antena está formada por tres segmentos. El primero de ellos (segmento basal) es el que une la antena a la cabeza y recibe el nombre de escapo, el segundo se denomina pedicelo y el tercero flagelo. El flagelo está a su vez subdividido en anillos, que en el caso de las hembras (obreras y reina) son 10 y en el de los machos (zánganos), 11.
Las antenas se mueven, por tanto deben de tener lo que nosotros conocemos como articulaciones y músculos. La forma de las articulaciones de las abejas suelen ser bastante diferentes a las nuestras, pero la función es la misma: permitir el movimiento.
Las abejas tienen en sus antenas dos articulaciones. La primera se localiza entre la cabeza y el primer segmento antenal (escapo), y permite realizar movimientos de rotación de toda la antena. La segunda articulación se localiza entre el pedicelo y el flagelo, y solamente permite mover la antena hacia arriba o hacia abajo en relación a la posición del primer segmento de la antena, que recordemos que se llama escapo.
El movimiento de la antena se controla gracias a cuatro músculos localizados en la cabeza (mueven el escapo) y dos músculos situados en el escapo que permiten el movimiento de la articulación situada entre el escapo y el pedicelo. Recordamos que el escapo permite movimientos de rotación, pero la segunda articulación sólo permite mover la antena hacia arriba o hacia abajo.
¿Qué órganos receptores podemos encontrar en la superficie de las antenas? Recordemos también que hemos hablado del olfato y del gusto, pero estos no son los únicos "sentidos" presentes en las antenas.
Vamos a volver brevemente a la morfología, es decir, el estudio de la forma. Desde este punto de vista los órganos receptores de la superficie de las antenas se han clasificado en siete tipos diferentes.



En el borde distal de los últimos ocho anillos del flagelo las abejas cuentan con un peque

El grupo principal es el formado por las sensilas tricoideas. Para hacer un símil podemos decir que son estructuras parecidas a los pelos y en la antena de una obrera hay unas 3000 sensilas de este tipo. De acuerdo a su forma, longitud y otras características se han subdividido en cinco tipos diferentes.
También se han descubierto cuatro tipos de estructuras "parecidas a pelos" que no presentan inervación nerviosa, reciben el nombre de setas.
Finalmente están las sensilas placoideas que ocupan una importante área de la superficie de la antena. Las obreras cuentan con unas 2.700 estructuras de este tipo, las reinas tienen 1600 y los zánganos entre 15000 y 16000. Cada una de ellas consiste en un área de forma oval rodeada por una ligera depresión con forma de anillo. La cutícula que las recubre presenta poros (entre 2400 y 3000) y no todas ellas están inervadas por el mismo número de neu-



eño grupo de sensilas que se han propuesto como receptores de temperatura y humedad.

ronas. ¿Cuál es su función?

1.1. El sentido del olfato

El tamaño de las sensilas placoideas ha permitido realizar registros electrofisiológicos que han demostrado su papel como receptores olfativos. Estos registros también han demostrado que estos receptores son sensibles a varios componentes producidos en las glándulas de Nasanov, así como a un amplio rango de olores de plantas y flores. En el caso de los zánganos son especialmente sensibles a las feromonas que producen las reinas.

En el medio terrestre seco los animales que cuentan con receptores olfativos se tienen que enfrentar al problema de exponer dichos receptores al aire con una pérdida mínima de agua (las terminaciones de las células nerviosas receptoras están siempre en un entorno líquido más o menos viscoso). ¿Cómo solucionan las abejas este problema? Recurriendo a dos estrategias, la primera es agrupar los receptores y la segunda asociarlos a modificaciones de la superficie de la cutícula.

1.2. El sentido del gusto

Además de receptores olfativos las abejas cuentan en sus antenas con receptores para el sentido del gusto. Este hecho es muy corriente en los insectos y los receptores para este sentido reciben el nombre de quimiorreceptores.

El sentido del gusto no solo implica "probar la posible comida", las abejas además lo utilizan para detectar algunas feromonas relativamente "no volátiles" que regulan la actividad de la colonia. Estas feromonas al ser poco difusibles por el aire tienen que ser adsorbidas sobre la superficie corporal. Muchas sensilas gustativas se emplean para tocar a otras abejas compañeras.

Los quimiorreceptores de las abejas son bastante parecidos a los de tipo olfativo, la principal diferencia estructural consiste en que su superficie no está cubierta de poros, localizándose una abertura en el extremo o ápice de la estructura sensorial. Los receptores de tipo olfativo suelen estar asociados a zonas corporales que exploran o manipulan la comida.

1.3. El sentido del tacto

Los receptores de tipo táctil reciben el nombre de mecanorreceptores, están presentes en la superficie de las antenas y su morfología es variada ("pelos" o "espinas"), además su rigidez o flexibilidad es variable por lo que podemos encontrar una gama que va desde estructuras (sensilas) largas y flexibles hasta cortas y rígidas espinas. Además de en las antenas podemos encontrar receptores táctiles en toda la superficie corporal de las abejas.

Los mecanorreceptores consisten en expansiones o proyecciones huecas de la cutícula (pelos o espinas) rodeadas de un estrecho anillo membranoso que permite que el eje de esta sensila se pueda doblar en relación a la superficie corporal. Hay pelos o espinas que se pueden mover en cualquier dirección, pero otros tienen limitado su movi-

miento y solamente se pueden desplazar en una cierta dirección o arco. En la base de la sensila (pelo o espina) se localiza una célula receptora especial que es sensible a la deformación.
En ciertos lugares del cuerpo de las abejas los receptores táctiles se reúnen formando una especie de placas de pelos. De hecho la información sobre la posición de la antena se obtiene básicamente gracias a estas placas de pelos y al órgano de Johnston que describiremos posteriormente.
En la articulación entre cabeza y antena (escapo) hay una gran cantidad de pelos que actúan como mecanorreceptores e informan sobre los movimientos de la antena.
Los receptores táctiles de los anillos del flagelo se concentran en la superficie ventral y en los extremos. Esta zona de las antenas juega un importante papel en la exploración y prueba, además probablemente es la primera zona corporal que entra en contacto con una compañera, con la superficie de los cuadros de la colmena o con la superficie de las plantas.

1.4 Otros receptores de las antenas

En el borde distal de los últimos ocho anillos del flagelo las abejas cuentan con un pequeño grupo de sensilas que se han propuesto como receptores de temperatura y humedad. Los registros electrofisiológicos realizados en uno de los tipos indican la presencia de tres tipos de receptores, uno de ellos responde al incremento en la humedad, otro a la bajada de la temperatura y el tercero a la subida. Sabemos también que las abejas son muy sensibles a los cambios en la concentración del gas anhídrido carbónico, y los estudios realizados sugieren la presencia de estos receptores en las antenas.
La información que se obtiene de los sensores localizados en las antenas también permiten que durante el vuelo los insectos puedan estimar su velocidad.

1.5 El órgano de Johnston

Inicialmente podemos decir que este órgano es algo particular ya que externamente no puede verse. Se localiza dentro de la antena y aunque parezca raro es sensible a los sonidos transmitidos por el aire.
Consiste en varias células sensoriales ordenadas formando un cilindro hueco dentro del pedicelo. Uno de los extremos de esta estructura se pega a la pared del extremo proximal del pedicelo y el otro a la membrana intersegmental situada entre el pedicelo y el flagelo. La estimulación de las células sensoriales se produce



Para poder percibir el sonido producido por la pecoreadora danzante hay que colocarse muy cerca del emisor, ya que a una distancia de unos milímetros la intensidad del sonido baja unas 200 veces.

gracias a los movimientos del flagelo en relación al pedicelo.

1.6 El lenguaje de la danza y el órgano de Johnston

La danza de comunicación de las abejas es uno de los aspectos de su biología mejor conocido y resulta bastante sorprendente para una persona que no conozca la biología de las abejas.

Recordemos de forma breve que una abeja pecoreadora para indicar la localización y distancia de una fuente de alimento danza en uno de los cuadros verticales situado dentro de la colonia. El ángulo en el que realiza sus movimientos si tomamos como valor "0" la vertical del cuadro, indica la posición del sol respecto de la fuente de alimento, luego ya tenemos la dirección, ahora sólo nos falta conocer la distancia.

Para indicar la distancia las abejas realizan dos tipos de danzas. Si la fuente de alimento se encuentra a una distancia de la colmena no superior a los 100 m, la abeja pecoreadora se mueve rápidamente en círculos (danza circular) variando cada cierto tiempo el sentido de la marcha. La intensidad de la danza así como su duración están relacionadas con la abundancia relativa de la fuente de alimento.

Si la comida se sitúa más allá de los 100 m la abeja realiza otro tipo de danza (danza en semicírculo) que básicamente representa la figura del número "8". Esta danza cuenta con dos recorridos más o menos rectos (la zona central del "8") y dos giros que se corresponden con los extremos del número. El recorrido recto de esta danza se acompaña con movimientos del abdomen, por este motivo se le ha dado también el nombre de "danza del vientre". También la velocidad con la que realiza la danza está correlacionada de forma directa con la distancia a la fuente de la comida (la velocidad de la danza se reduce conforme se incrementa la distancia a la que se encuentra el alimento).

Mientras ejecutan su danza las abejas también emiten pulsos de sonido haciendo vibrar las alas en el plano dorso-ventral. La frecuencia de este sonido es de 200-300 Hz y las abejas pueden producir unas 15 ráfagas de sonido por segundo.

Para poder percibir el sonido producido por la pecoreadora danzante hay que colocarse muy cerca del emisor, ya que a una distancia de unos milímetros la intensidad del sonido baja unas 200 veces. Las abejas sitúan sus antenas muy cerca de la abeja danzante y gracias al órgano de Johnston reciben las vibraciones transmitidas por el aire.

Desconocemos cómo interpretan las abejas el sonido dentro del lenguaje de la danza, pero si sabemos que existe una alta correlación entre la duración del sonido y la distancia a la fuente alimenticia.

Hasta ahora solamente hemos descrito la transmisión de información de la abeja danzante hacia sus compañeras, y podemos suponer que al igual que ocurre cuando nosotros contamos algo, tienen que existir algún mecanismo que

Desconocemos cómo interpretan las abejas el sonido dentro del lenguaje de la danza, pero si sabemos que existe una alta correlación entre la duración del sonido y la distancia a la fuente alimenticia.

permita "hacer preguntas" de los escuchantes hacia el relator, o en el caso que nos ocupa de las abejas acompañantes a la danzante.

Las abejas que atienden a la danza se comunican con la abeja danzante mediante vibraciones que se transmiten por el cuadro en el que se está desarrollando la danza. Estas vibraciones son recogidas por unas estructuras sensibles localizadas en las patas. ¿Cómo se producen estas vibraciones? De una forma muy simple, las abejas presionan su tórax contra el cuadro a la vez que hacen vibrar los músculos del vuelo. Cuando la abeja danzante percibe estas señales deja de "bailar" y reparte pequeñas dosis de comida a sus compañeras.

2. Los ojos compuestos

Los ojos compuestos son estructuras muy prominentes en la cabeza de nuestros queridos insectos, sobre todo en el caso de los zánganos ya que en ellos son las estructuras más grandes.

Los insectos, al igual que nos ocurre a nosotros, necesitan contar con una buena visión que abarque un amplio campo visual (visión panorámica). En el caso de las abejas la necesidad de una visión panorámica es más acuciante que en nuestro caso, ya que ellas no pueden girar la cabeza. Si una abeja quiere ver algo que está fuera de su campo visual tiene que mover todo su cuerpo, nosotros podemos solucionar el problema en muchas de las ocasiones girando solamente la cabeza.

Para solucionar el problema de contar con un amplio campo de visión la evolución ha favorecido, en el caso de las abejas, el desarrollo de una retina convexa que se extiende por una amplia superficie de la cabeza.

Las retinas convexas, como ocurre con casi todas las estructuras de un ser vivo, tienen "ventajas" e "inconvenientes". El principal problema de las retinas convexas es que la forma no facilita el desarrollo de buenas lentes y una buena lente es necesaria para tener una buena visión. Por este motivo la solución estructural para mejorar la visión consiste en dividir la superficie en "porciones", contando cada una de ellas con una lente propia y las correspondientes células receptoras.

El ojo compuesto de las abejas está formado exteriormente por un cierto número de unidades que reciben el nombre de facetas. Su número no es idéntico en todos los habitantes de la colmena. Los ojos de los zánganos tienen unas 10000, las obreras entre 5000 y 6000 y la reina unas 3500. Además entre las facetas podemos encontrar pelos (sensilas) que actúan como mecanorreceptores.

Cada unidad estructural del ojo de las abejas recibe el nombre de omatidio. Su forma es cónica y está compuesto por una cutícula similar a la que recubre todo el cuerpo del animal, pero en este caso es transparente y actúa como una lente. Debajo de la cutícula se encuentra el cono cristalino que es una estructura con forma de cono, como indica su nombre. El cono cristalino ayuda a la lente en el proceso de captación de la luz, pero además la concentra sobre un círculo de células fotorreceptoras (células retinianas) que se localiza debajo.

El borde interno de las células fotorreceptoras se encuentra modificado, las membranas celulares están plegadas formando varias capas que reciben el nombre de microvellosidades. Las microvellosidades se localizan en el centro del omatidio, se disponen perpendicularmente al eje y forman un área más o menos circular que recibe el nombre de rabdómero. En cada omatidio hay 9 células retinianas que contienen los pigmentos visuales, están fusionadas y se extienden a lo largo del omatidio.

El ojo de los insectos funciona de forma algo diferente a como lo hace nuestro propio ojo. En nuestra especie las células de la retina "resuelven" la imagen que se forma dentro del ojo. Para hacer un símil y sin entrar mucho en profundidades y procesos

fisiológicos, podemos suponer que nuestro ojo se parece mucho a una cámara fotográfica. Las lentes de la cámara "proyectan" una imagen del mundo exterior sobre la película sensible (volviendo a nuestro ojo, la película fotográfica serían nuestras células de la retina) que "resuelve" la imagen (la foto que vemos).
En las abejas las 9 células que forman el rabdómero de cada omatidio (recordemos que los zánganos tienen unos 10000 omatidios en un solo ojo) funcionan como una unidad y no "resuelve" la imagen que la lente proyecta en el interior del ojo.
Obviamente no somos abejas y no podemos "sentir" como es la visión de ellas, pero de los datos que tenemos podemos suponer con cierta seguridad que en el caso de las abejas la imagen del mundo exterior se forma como una especie de mosaico de manchas brillantes y oscuras. Cada omatidio sería el encargado de producir una de las "manchas" del mosaico (imagen). El funcionamiento del ojo sería algo parecido a como funcionan los marcadores electrónicos de algunos estadios y aeropuertos.
Si comparamos nuestro ojo con el de las abejas, sabemos que nuestra capacidad de resolución espacial es bastante mejor. La resolución la podemos definir como la capacidad de ver dos objetos muy cercanos como dos objetos diferentes, en vez de cómo un único objeto.

Los ojos compuestos son estructuras muy prominentes en la cabeza de nuestros queridos insectos, sobre todo en el caso de los zá



La capacidad de un ojo para resolver detalles de la imagen depende básicamente de dos factores: el número y separación de/entre receptores y la calidad óptica de la imagen. Ya hemos comentado la "calidad óptica" de la imagen, que sabemos que no es muy buena en el caso de las abejas. Si por esta vía no podemos mejorar la resolución, vamos a explorar la otra posible vía: disminuir la separación entre receptores.

En el caso del ojo compuesto de las abejas se puede reducir la distancia entre omatidios disminuyendo la curvatura del ojo. Esta solución (que mejora el poder de resolución) no se puede aplicar a toda la superficie, pero sí es posible hacerlo en una o varias zonas. Obviamente en estas zonas la resolución de la imagen sería bastante mejor. Nosotros tenemos algo parecido en nuestros ojos y esa zona que tiene un alto poder de resolución recibe el nombre de fovea.

Las obreras cuentan en su ojo con una zona más plana que el resto, además está provista de facetas de mayor tamaño. Esta zona se localiza en la región media del ojo.

También los zánganos cuentan con zonas poco curvadas en sus ojos. Recordemos que para ellos es primordial localizar a las reinas en los vuelos nupciales. De hecho el ojo de un zángano se puede dividir en tres regiones y utiliza la zona dorsal (la de visión más aguda) para localizar a las rei-

nganos, ya que en ellos son las estructuras más grandes.



nas en vuelo.
Aunque el ojo de las abejas tenga una resolución espacial peor que la nuestra, la resolución temporal es mejor que la de los humanos. Para explicar en que consiste la resolución temporal tenemos que recurrir a un ejemplo.
Imaginemos que estamos en una habitación oscura y alguien enciende y apaga rápidamente una fuente de luz. Obviamente veríamos el flash como un fogonazo de luz. Ahora la persona que enciende y apaga la luz lo va a hacer de forma cada vez más rápida. En este caso veríamos que la secuencia de flases cada vez es más rápida (resolución temporal) hasta que llega un momento en que veríamos una luz continua (fusión del parpadeo). Esto se debe a que los receptores de nuestros ojos necesitan una cierta cantidad de tiempo para hacer su trabajo. Para nosotros los humanos una luz con una frecuencia de 35-40 Hz se percibe como una luz continua.
Los insectos en general tienen una resolución temporal bastante mejor que la nuestra. Una abeja puede "ver" el parpadeo de un tubo fluorescente (nosotros vemos una luz continua), ya que con luz brillante la fusión del parpadeo se produce con una frecuencia de 150-200 Hz.

2.1. La visión y el color de las plantas

Para las abejas, al igual que para cualquier otro animal, conseguir el alimento necesario para seguir vivo es una tarea fundamental. En la actividad de las pecoreadoras la visión juega un papel fundamental. De alguna forma tienen que reconocer rasgos de las plantas y de las flores, pero ¿qué tipo de rasgos son importantes? Obviamente la forma, el tamaño y el color juegan un importantísimo papel, sin olvidar que el olor también es una característica muy importante.
Vamos a comenzar nuestra exposición por el color. Desde los trabajos pioneros de Karl von Frisch, son muchos los investigadores que han estudiado la forma en que las abejas perciben los colores. Frisch en una serie de experimentos clásicos sobre el color y su percepción por las abejas, encontró que los animales confunden el gris oscuro y el negro con el color rojo.
El mecanismo básico de percepción del color en los humanos y las abejas es el mismo y recibe el nombre de tricromía ya que hay tres colores básicos. Pero aunque el mecanismo básico sea el mismo hay diferencias ya que no vemos la misma zona del espectro, es decir, vemos diferentes "colores".
Nuestra especie puede percibir luz en una zona del espectro electromagnético comprendido entre los 370 y 750 nanómetros (nm). Si el espectro lo traducimos en color nosotros vemos desde el color azul (370nm) hasta el rojo (750nm), pasando por diferentes tonos de naranjas, amarillos y verdes.
Las abejas pueden ver entre los 300 y los 650 nanómetros. Los 300 nm se incluyen en lo que se conoce como ultravioleta cercano (UV-A) y que podemos considerar como diferentes tonos de color azul más o menos pálido. En el otro extremo tenemos los 650 nm que se corresponden más o menos con un color anaranjado amarillento.
Las células encargadas de percibir el color en nuestros ojos reciben el nombre de conos. En cada ojo contamos con unos 3 millones de células de este tipo, que tienen una forma algo particular de responder a la luz que les llega. Su respuesta no es lineal a todo el espectro de luz visible, sino que hay unas determinadas longitudes de onda a las que estas células responden con picos de actividad. En nuestra especie los picos se producen en los 430 nm (azul), 530 nm (verde) y 560 nm (rojo).
El equivalente en las abejas a los conos son los rabdómeros. Cada rabdómero se divide en 8 regiones y cada una tiene un pico de actividad en una determinada frecuencia del espectro. Tres células la tienen en los 340nm (ultravioleta), 2 en los 463 nm (azul) y 4 en los 530 nm (verde).
Si las abejas y los humanos vemos colores algo diferentes, el color de las flores también debe de ser algo diferente. Además muchas de ellas pueden reflejar el "color" ultravioleta, "color" que no existe para nosotros. Como ejemplo de algunas diferencias podemos citar que para las abejas la mezcla de amarillo, azul y ultravioleta da un color "blanco" que podemos denominar como "blanco de abeja". Varias flores que para nosotros tienen un color blanco o rosa si no reflejan el ultravioleta (recordemos que es un "color" que nosotros no vemos) para las abejas son azules o verdes si solamente reflejan la zona azul o amarilla del espectro.
Resumiendo, podemos decir que las abejas ven las flores de forma algo o bastante diferente a como nosotros las vemos. Para terminar con esta cuestión podemos afirmar que muchas de las plantas con polinización anemófila (viento) suelen tener flores que para las abejas son de un color "verde pálido" no muy diferente al del follaje que las rodea.
Algunas plantas ofrecen a las abejas señales visuales adicionales que se conocen como guías de néctar. Básicamente es un color (suele participar el ultravioleta) que señala de forma inequívoca donde está la fuente de néctar. Sería como una especie de "letrero" que dice: "Aquí tienes un estupendo néctar". Un símil muy general sería el color brillante de una gasolinera, que podemos ver cuando en la noche viajamos por carretera y que nos permite llegar a ella de forma segura y fácil.

2.2 Visión, pecoreo y lenguaje de la danza

Sabemos que las pecoreadoras pueden volar grandes distancias para buscar comida y que gracias al lenguaje de la danza pueden localizar una fuente de alimento. También sabemos que en el lenguaje de la danza el sol es una de las referencias más importantes.

La resolución espacial del ojo compuesto de la abeja no es lo suficientemente buena como para ver el sol como un objeto, entonces ¿cómo pueden usarlo? Para una abeja el cielo presenta un gradiente de color y el sol es la zona más brillante (no lo ve de forma individualizada, que es la forma como lo vemos nosotros). También para una abeja el cielo es rico en ultravioleta (recordemos que es un "color" que nosotros no podemos ver) y la región donde hay menos ultravioleta es la que ocupa el sol. El ultravioleta es visible aunque el cielo se encuentre ligeramente nublado.

Además de lo expuesto en el párrafo anterior, las abejas pueden utilizar en sus vuelos la luz polarizada (otro tipo de luz que tampoco vemos los humanos). La luz del sol que nosotros vemos oscila en todas direcciones, pero la luz polarizada oscila en una única dirección perpendicular a la trayectoria que describe el sol. Las abejas usan la zona ultravioleta del espectro para "ver" la dirección de la luz polarizada.

Las células del ojo compuesto de una abeja sensibles a la luz polarizada se localizan en una estrecha banda de omatidios (140 o mas en las obreras) situados alrededor del borde dorsal del ojo (área POL). En esta zona las células retinianas son algo diferentes a las presentes en el resto de omatidios. Además la disposición de las células hace que en el área POL los receptores al ultravioleta tengan una máxima sensibilidad a la luz polarizada.

Las células sensibles al ultravioleta del área POL ordenan sus microvellosidades de forma que se disponen en ángulo recto una respecto a las otras. Los receptores que presentan esta disposición se conocen como X e Y.

El análisis de la luz polarizada se realiza de la forma siguiente: las abejas examinan el cielo hasta que la respuesta de los receptores tipo X es máxima. Esto ocurre cuando estos receptores tienen el mejor alineamiento con el patrón de luz polarizada que presenta el cielo. Los receptores Y están dispuestos en 90º en relación a los X, esta disposición incrementa la sensibilidad hacia la luz polarizada y el resultado es que estas células responden a los cambios en la dirección de la polarización (movimiento de la abeja).

2.3. El uso del sol y otros hitos como puntos de referencia

Usar el sol como un punto de referencia tiene un problema, el sol se mueve y su posición cambia en relación al tiempo. Si lo queremos usar como referencia tenemos que tener en cuenta también el factor tiempo.

Varias investigaciones realizadas sugieren que las abejas aprenden la dirección en la que se mueve el sol. Este aprendizaje alcanza su plenitud después de 5-8 días de realizar labores fuera de la colmena.

Hemos expuesto que si queremos utilizar el sol como una referencia es necesario tener en cuenta el factor tiempo. Gracias a diversas evidencias también sabemos que las abejas cuentan con un reloj biológico que mide de forma bastante exacta el paso del tiempo.

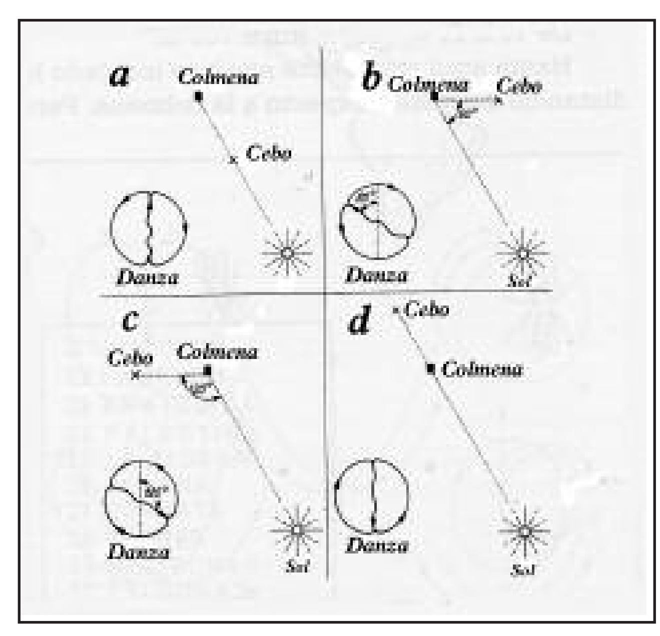
Supongamos que una abeja que vamos a denominar "A" está aprendiendo de una compañera danzante ("B") donde se encuentra una fuente de comida. La danza que se realiza dentro de la colonia puede durar un cierto tiempo, por lo tanto cuando la abeja "A" sale de la colonia el sol puede haber cambiado de posición. Vamos a suponer ahora que la fuente de néctar se encuentra a 2 km de la colonia. Mientras que nuestra abeja "A" va, recoge su carga de néctar e inicia el retorno, pasa un importante lapso de tiempo y el sol ha cambiado de posición. ¿Cómo se apaña la abeja para no desviarse de su camino y volver a la colonia?

Hay bastantes evidencias que sugieren que las abejas son capaces de "memorizar" la posición relativa del sol a intervalos (lapsos de tiempo), así mismo relacionan la posición del sol con marcas o hitos (ej. árboles o caminos) situados alrededor de la colonia y actualizan la información con el paso de las estaciones.

Sabemos que nuestras amigas utilizan el sol y otras marcas para orientarse en sus vuelos, pero, ¿hasta que punto reconocen posibles diferencias entre marcas parecidas?

Volvamos a los estudios clásicos sobre este tema. Los primeros trabajos buscaban conocer si las abejas podían distinguir diferentes tipos de marcas horizontales (formas geométricas). Los investigadores descubrieron que las

Esquema de la danza de las abejas.





La forma, el tamaño y el color de las plantas juegan un papel fundamental a la hora de conseguir alimento.

pecoreadoras podían distinguir entre figuras de color negro homogéneo (figuras sólidas) y figuras con contornos negros pero con el interior blanco (figuras abiertas). Un ejemplo típico sería un cuadrado pintado de negro y un rombo con el interior pintado de blanco.
Encontraron que las abejas pueden distinguir entre formas sólidas y abiertas, pero no entre figuras sólidas o entre figuras abiertas, máxime cuando la longitud del contorno era similar.
Hemos descrito el resultado de experimentos que utilizan marcas horizontales, pero ¿que ocurre cuando se usan marcas verticales? Si utilizamos discos redondos con la mitad pintada de negro y la otra mitad de blanco y los vamos girando, los resultados muestran que las abejas pueden identificar giros superiores a los 20º.
Para que el pecoreo resulte una actividad fructífera es necesario realizar un reconocimiento tridimensional del entrono de la abeja. Pero las abejas carecen de la visión estereoscópica que nosotros tenemos. Ellas estiman la distancia a un objeto por su tamaño. Si se entrenan grupos de abejas a alimentarse en un lugar con una marca muy conspicua o evidente (llamativa) y la reemplazamos por otra de mayor o menor tamaño, las abejas buscan la comida más cerca o más lejos. Esta forma de orientarse la utilizan en las zonas conocidas, pero no en los territorios que les son desconocidos.
Cuando las abejas vuelan en un territorio desconocido utilizan para evaluar la distancia otro sistema que se basa en como se mueven los objetos. Esta forma de orientarse es fácil de explicar.
Supongamos que vamos en un coche por la carretera, los objetos cercanos al coche pasan rápidamente por nuestro campo de visión, en cambio los objetos lejanos apenas se mueven.

Agradecimientos
La realización del presente trabajo ha sido posible gracias a los fondos económicos del Proyecto de Investigación API06-010 incluido en el Programa Nacional Apícola, Línea F, del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.